

# **SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**

**ALBERTO MARIO BOLAÑO ENNIS**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA  
INGENIERÍA AMBIENTAL  
ENVIGADO  
2009**

# **SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**

**ALBERTO MARIO BOLAÑO ENNIS**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO AMBIENTAL**

**SANTIAGO VÉLEZ VELÁSQUEZ  
INGENIERO AMBIENTAL**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA  
INGENIERÍA AMBIENTAL  
ENVIGADO  
2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a mis padres por haberme brindado todos los valores necesarios para poder triunfar.

# CONTENIDO

pág.

1.1	Planteamiento del problema .....	9
1.2	Objetivos del proyecto .....	10
1.2.1	Objetivo General:.....	10
1.2.2	Objetivos Específicos: .....	10
1.3	Marco teórico.....	10
1.3.1	Flotación por Aire Disuelto.....	10
1.3.1.1	Descripción del proceso.....	10
1.3.1.2	Cantidad de aire requerido.....	12
1.3.1.3	Parámetros de operación.....	13
1.3.2	Características de las Aguas Residuales de Plantas de Sacrificio.....	15
1.3.1.1	Características físicas .....	15
1.3.1.2	Características químicas.....	16
1.3.3	Coagulación y Floculación.....	17
1.3.4	Normatividad vigente .....	19
4.1	Coagulante .....	27
4.2	Ensayo .....	27
4.3	Ensayo de flotación .....	30

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Características de las Aguas residuales de una planta de sacrificio.....	15
Tabla 2. Valores de vertimiento según artículo 72. ....	19
Tabla 3. Valores de vertimiento según artículo 73. ....	19
Tabla 4. Valores de vertimiento según artículo 73. ....	19
Tabla 5. Valores iniciales de vertimientos .....	27
Tabla 6. Parámetro de funcionamiento .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 7. Resultados obtenidos.....	34
Tabla 8. Entrevistas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## RESUMEN

Los sistemas de flotación por aire disuelto (FAD) se fundamentan en la formación de micro burbujas que permitan la flotación del material suspendido presente en el agua a tratar, al formar un conjunto aire – sólido suspendido con una densidad inferior a la del agua. Los sistemas FAD se componen básicamente de dos unidades: el saturador y la celda de flotación. En el saturador se somete el agua a varias atmosferas de presión para luego ser liberada en la celda de flotación, la cual se encuentra abierta a la atmosfera. La formación de micro burbujas se da cuando el exceso de aire aportado al agua en el saturador sale nuevamente a la atmósfera en la celda de flotación.

Para evaluar el sistema DAF se empleó un agua residual proveniente una planta de sacrificio de aves, la cual presenta un alto contenido de sólidos suspendidos y grasas y aceites; es importante mencionar que actualmente la planta de sacrificio de aves vierte directamente las aguas residuales al sistema de alcantarillado con un tratamiento básico el cual no presenta buena eficiencia.

Por medio de este trabajo se buscó evaluar un sistema DAF por medio de pruebas piloto, desarrolladas en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, donde se obtuvieron los principales parámetros de operación del sistema. Además, se obtuvo un conocimiento acerca del manejo de la celda de flotación por aire disuelto.

Durante las pruebas piloto desarrolladas se pudo determinar que el sistema DAF puede lograr eficiencias superiores al 80% en la remoción de parámetros como DQO, sólidos suspendidos, grasas y aceites presentes en aguas residuales provenientes de plantas de sacrificio avícola.

## **ABSTRACT**

Dissolved air flotation (DAF) systems are based on forming microbubbles that allow the flotation of suspended matter in the water object to be treated, by joining air and suspended solids with density lower than water. FAD systems essentially are composed by two units: the saturator and the flotation cell. In the saturator, water is exposed to several atmospheres pressure before being released into the flotation cell, which is open to the atmosphere. Microbubbles are formed when the excess of air supplied to the water in the saturator goes back to atmosphere pressure on the flotation cell.

To evaluate DAF system we use a wastewater from a poultry slaughter plant, which has a high content of suspended solids and fats and oils, it is important to note that currently the wastewater from the slaughter plant is discharge directly into the sewer system with a basic treatment which does not show good efficiency.

This project was done in order to evaluate DAF systems carried out through pilot tests conducted on the Environmental Engineering laboratory at the Escuela de Ingeniería de Antioquia where we obtained the main parameters to operate the system. In addition, knowledge gained about the management of the dissolved air flotation cell.

During the trials developed in this project it was determined that the proposed system offers a 80% higher efficiency in the removal of characteristic parameters such as COD, suspended solids, fats and oils in the wastewater from poultry slaughter plants

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día es indispensable para las industrias plantear sus procesos productivos de tal manera que se satisfagan las necesidades actuales sin comprometer las necesidades futuras, garantizando el uso sostenible de los recursos naturales.

La flotación por aire disuelto es un sistema de tratamiento de aguas residuales desarrollado para la remoción de sólidos suspendidos, aprovechando la fuerza de empuje generada a partir de la inyección de micro burbujas dentro de la emulsión agua-sólidos. Por medio de este trabajo de grado se pretende diseñar un sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una planta de sacrificio de aves ubicada en el Municipio de Medellín, y así abrirle las puertas a una alternativa diferente de tratamiento de aguas residuales.

Este trabajo de grado se desarrolla de manera experimental ya que para el diseño de este sistema fue necesario realizar pruebas pilotos para encontrar parámetros fundamentales de operación del mismo, además de comprobar la eficiencia del sistema en cuanto a la remoción de sólidos suspendidos, grasas y aceites en aguas residuales industriales. Con lo ensayado, investigado y observado se procedió a realizar los ensayos con un agua residual proveniente de una planta de sacrificio avícola dado que ésta presenta características físicas y químicas que pueden llegar a ser removidas por el sistema propuesto.



# 1. PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al surgimiento de actividades industriales, la calidad del agua se ha ido deteriorando por parte del hombre ya que cada día se genera mayor contaminación para la elaboración de bienes, alterando el recurso y haciendo su tratamiento cada vez más difícil. El tratamiento de las aguas residuales y la exigencia normativa por parte de la autoridad ambiental se ha convertido en un factor determinante de la gestión ambiental en las industrias.

La optimización de los recursos naturales se ha convertido en pieza clave para todas las industrias, dado que el buen uso de estos, genera un impacto positivo hacia los clientes, las entidades financieras y hace parte de la responsabilidad social que debe tener una empresa. Por esto, es necesario que las industrias realicen el tratamiento de las aguas residuales como parte de su estrategia y cumplimiento de la legislación.

Dentro de las principales causas por las cuales las industrias no tratan sus aguas residuales se destacan: la situación económica actual, la falta de espacio en sus plantas y la falta de conocimiento acerca de sistemas de tratamientos de aguas residuales.

El contenido de carga contaminante en las aguas residuales industriales depende esencialmente del proceso productivo. Los principales factores contaminantes que presentan las aguas residuales son: sólidos en suspensión, materia orgánica, patógenos, nutrientes, contaminantes prioritarios (compuestos orgánicos e inorgánicos determinados con base en su peligrosidad, materia orgánica refractaria, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos (Metcalf & Eddy, 1995).

Se puede decir que las grasas y aceites hacen parte del material flotante presente en algunas aguas residuales, originando un gran perjuicio para el agua, ya que la película de grasa impide la transferencia de gases, además, la disminución del pH y los fuertes olores que emite por la descomposición de ésta en el agua y estéticamente su apariencia no es la mejor.

El tratamiento de aguas residuales utilizando la flotación por aire disuelto es una alternativa compacta, económica y eficiente, además presenta una alta eficiencia de remoción de material flotante y los sólidos suspendidos. Por esto, se pretende diseñar un sistema de flotación por aire disuelto para tratar aguas residuales industriales, para ofrecer una alternativa viable económicamente y brindar una solución a industrias que no poseen suficiente espacio para el montaje de sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, y así lograr el cumplimiento de los parámetros de vertimiento según el Decreto 1594 de 1984.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General:**

Evaluar un sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de efluentes con alto contenido de sólidos suspendidos y material flotante.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

- Determinar para qué tipo de aguas residuales industriales es aplicable la tecnología de flotación por aire disuelto.
- Definir los principales parámetros de diseño para el sistema de tratamiento por flotación por aire disuelto.
- Obtener los valores adecuados de los distintos parámetros de diseño por medio de pruebas piloto con muestras de un efluente industrial determinada.

## **1.3 MARCO TEÓRICO**

### **1.3.1 Flotación por Aire Disuelto**

La flotación por aire disuelto (FAD) es un proceso unitario que consiste en separar sólidos en suspensión y algunas sustancias coloidales y emulsionadas de una fase líquida continua. La separación se lleva a cabo al introducir finas burbujas de aire dentro del líquido. Las burbujas se adhieren a las partículas sólidas o sustancias coloidales floculadas, que reducen su densidad convirtiéndolas en material flotante fácilmente removible. La FAD es especialmente efectiva en la remoción de partículas de baja densidad tales como algas, aceite libre y emulsionado, grasa, pulpa de papel, etc., ya que esta incrementa las velocidades de ascenso y efectúa la remoción en poco tiempo; también, es un método viable de remoción de partículas más densas que el agua, pero con velocidades de sedimentación bajas (Echeverri, 1996).

#### **1.3.1.1 Descripción del proceso**

Los componentes básicos de un sistema FAD son: compresor de aire, saturador o celda de presurización (para conseguir el contacto aire-líquido), válvula reductora de presión, y el tanque de flotación.

Una pequeña porción del agua tratada en la unidad de flotación, se recircula y se satura con aire bajo presión en un saturador o celda de presurización. El agua saturada con aire es inyectada dentro de una tubería que alimenta el agua floculada a la unidad de flotación a través de una válvula reductora de presión u otro dispositivo especial, para conseguir por este medio del proceso de despresurización, una liberación efectiva del aire. La liberación de la presión causa una sobresaturación inmediata de aire en el agua; este aire, en exceso de saturación, es liberado en forma de micro burbujas (20 a 100  $\mu\text{m}$ ). Las burbujas de aire desprendidas se adhieren a las partículas de floc, formando aglomerados partícula-burbuja con una densidad más baja que la del agua; esto hace posible, que los

aglomerados partícula-burbuja asciendan a la superficie del tanque de flotación y se acumulen en forma de lodo flotante. Los sólidos, grasas y aceites concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos. El líquido clarificado puede separarse cerca del fondo del tanque y parte del mismo puede recircularse. El lodo que se acumula en la superficie puede ser removido en forma continua o discontinua por rebose o por barredores mecánicos (Echeverri, 1996).

Con la FAD se logran altas eficiencias de remoción de grasas y aceites y sólidos suspendidos de las aguas residuales industriales, con la ayuda de coagulantes.

En la flotación, la velocidad del proceso es determinada por un equilibrio de fuerzas, que incluyen la gravedad, la fuerza ascensional y la resistencia que ofrece el floc (o agregado partícula-burbuja) para desplazarse.

Se distinguen cuatro etapas en el proceso de flotación:

- Generación de las burbujas como una función de las diferencias de presión relativas y del diseño de los dispositivos de liberación.
- Contacto entre las burbujas y las partículas de floc.
- Adhesión de las burbujas a las partículas de floc, determinada por parámetros químicos de superficie.
- Ascenso del complejo aire/partícula a través de la unidad flotación, afectado en gran parte por la hidrodinámica de este tanque.



**Fotografía 1.** Celda de Flotación a escala de Laboratorio

Generalmente, los dispositivos usados para la liberación del aire en un sistema FAD son las válvulas de aguja; sin embargo, también son usadas algunas boquillas con diseño especial; la acción de dichos dispositivos permite reducir el tamaño de las burbujas (Echeverri, 1996).

Dado que el sistema de saturación del aire, representa el 50 % del costo de energía en el proceso de flotación, es importante saber cual es la mejor opción para disolver el aire bajo presión en la corriente de reciclo. Dentro de las diferentes opciones están: la dispersión de aire dentro del agua en un recipiente a presión (saturador), rociado del agua sobre un lecho empacado, rociado del agua dentro de un saturador sin empaque, arrastre de aire con eyectores e inyección del aire dentro de la línea de succión de la bomba de reciclo (Echeverri, 1996).

Para el desarrollo de este trabajo de grado se realizó el ensayo en una celda de flotación donde se presurizó el agua con aire en un recipiente a presión.

### 1.3.1.2 Cantidad de aire requerido

De acuerdo con la ley de Henry la solubilidad del aire en el agua es directamente proporcional a la presión aplicada al sistema, además la solubilidad del aire en el agua varía con la temperatura de ésta. La cantidad de aire que teóricamente puede desprenderse de una solución saturada, cuando la presión se reduce a 1 atm esta dada por la expresión:

$$S = S_a \times \left( \frac{P_a}{k} - 1 \right) \text{ en la cual:}$$

S = cantidad de aire desprendida a presión atmosférica debido a la caída de presión, mg/l.

S<sub>a</sub> = Saturación de aire a presión atmosférica, mg/l.

P<sub>a</sub> = Presión absoluta del sistema, kPa.

k = 101,325 kPa/atm.

En la práctica, la cantidad de aire que se desprende del agua, depende del grado de turbulencia existente en el sitio donde se reduce la presión y del porcentaje de saturación obtenido. El grado de saturación que puede obtenerse durante la presurización del efluente recirculado está relacionado con el diseño de la celda de presurización (saturador). La eficiencia del proceso de flotación depende de la cantidad de aire que tiene que ser adicionada al flujo de recirculación que logre la flotación del aceite y los sólidos suspendidos; se acostumbra expresar la eficiencia de funcionamiento de un sistema de flotación en términos de la calidad del efluente relacionada con la relación aire/sólidos aplicada al sistema (Echeverri, 1996).

La cantidad de aire suministrado al tanque de flotación se puede variar cambiando la velocidad del flujo de reciclo o la presión ejercida en el saturador, es decir, la cantidad de aire liberado depende la presión del saturador y de la relación de recirculación; sin

embargo, la calidad del agua tratada depende solamente de la cantidad total del aire suministrado y no de los valores individuales de presión y relación de reciclo empleada (Echeverri, 1996).

### 1.3.1.3 Parámetros de operación

**Relación Aire/Sólidos (A/S).** El funcionamiento del sistema FAD depende en gran medida de la relación (A/S); este termino combina la cantidad de sólidos suspendidos, cantidad de aire liberado y carga hidráulica dentro de una sola variable. La relación (A/S) está definida como la razón en peso de la cantidad de aire liberado a la de sólidos suspendidos presente en el agua residual:

$$A/S = \frac{\text{mg de aire liberado por despresurización}}{\text{mg de sólidos en el efluente}}$$

Generalmente, cuando se trata de remoción de aceite, la relación A/S es la razón en peso de la cantidad de aire liberado a la de aceite y sólidos suspendidos presente en el agua residual. La relación A/S esta definida por la ecuación:

$$A/S = \frac{S_a \times \left( f \times \frac{P_a}{k} - 1 \right) \times R}{C_{AS} F} \quad \text{en la cual:}$$

R = Flujo de reciclo, l/s.

F = Flujo de alimentado, l/s.

$C_{AS}$  = Aceite y sólidos suspendidos en la alimentación, mg/l.

$S_a$  = Saturación del aire a presión atmosférica, mg/1 atm.

$P_a$  = Presión absoluta del sistema, kPa.

k = 101,325 kPa/atm.

f = Fracción de saturación obtenida en la celda de presurización.

La relación A/S es un parámetro gobernante de la velocidad de ascenso de los aglomerados partícula-burbuja. Si el aire es insuficiente para enfrentarse con los sólidos suspendidos, grasas y aceite emulsionado entrante una cantidad de éstos estará presente en el efluente.

La relación A/S se estima a partir de estudios realizado a escala de laboratorio en unidades de flotación o en planta piloto. El intervalo típico de valores para la relación A/S es de 0,001 y 0,01 mg/mg.

Para una relación A/S óptima dada, es indiferente (dentro de ciertos límites) que una combinación de presión del saturador y relación de reciclo sea adoptada, con tal de que la relación A/S sea mantenida (Echeverri, 1996).

**Presión aplicada al saturador.** Según Echeverri, el intervalo de valores típicos para la presión en el saturador debe ser entre 345 y 585 kPa, aunque la presión óptima en el saturador para casi todas las velocidades de flujo de agua residual y concentraciones de aceite y sólidos suspendidos parece ser aproximadamente de 345 kPa. La presión mínima ejercida al saturador deberá ser de 300 kPa, ya que para presiones más bajas de 300 kPa se aumentan las dificultades para alcanzar una saturación completa, debido a la reducción de las fuerzas impulsoras y la eficiencia del sistema saturador asume una importancia mayor desde el punto de vista económico.



**Fotografía 2.** Celda de presurización a Escala de Laboratorio

**Relación de recirculación.** Es la razón (caudal de recirculación)/(caudal de agua residual) y usualmente se expresa como un porcentaje.

En la práctica los requerimientos de aire son descritos en términos de la relación de recirculación por su utilidad como variable de operación, puesto que es un indicador aproximado del aire suministrado. Normalmente son aplicadas razones de reciclo dentro del intervalo del 5 al 30%, sin embargo la relación de recirculación depende en gran parte de las condiciones específicas de operación, requeridas para proporcionar una eficiencia adecuada en el proceso de flotación(Echeverri, 1996).

La combinación de la relación de reciclo y presión del saturador debe ser seleccionada con base en las bombas y compresores disponibles, con la salvedad que la presión del saturador no sea menor de 300 kPa (Echeverri, 1996).

### 1.3.2 Características de las Aguas Residuales de Plantas de Sacrificio

Según la información consultada, los valores de los parámetros con los cuales cuentan las aguas residuales de plantas de sacrificio objeto de estudio se observan en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** Características de las Aguas residuales de una planta de sacrificio

PARAMETRO	DQO(mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	P Total (mg/l)	Referencias
VALOR	7.685 ± 646		1.742 ± 116	1.520 ± 128	217 ± 38	Cassidy & Belia (2005)
	40.300	24.900	3.450	2.160	200	Borja et al.(1995a,b)
	2.000- 6.200	1.300- 2.300	850-6.300	660-5.250	15-40	Caixeta et al. (2002)
	5.800	2.200- 9.800	2.400- 94.700			Fuchs et al. (2003)
	4.800- 12.600		1.900- 43.200	1.720- 33.100	110-880	
	3.969	1.730	2.580	1.960	171	Obaja et al. (2003)
	3.980- 7.125	2.035- 4.200	285-2.660		53,9- 91,7	Aguilar et al. (2005)

Fuente: Arvanitoyannis y Ladas, 2006.

Por medio de la tabla anterior se puede observar que los parámetros descritos por Arvanitoyannis y Ladas, 2006, presentan alta variabilidad para cada uno de las referencias evaluadas por estos autores. Por lo tanto éstos valores no se podrán utilizar como parámetros estándar para realizar pruebas pilotos en el laboratorio dado a las altas variaciones que este tipo de aguas presenta. Debido a esto fue necesario realizar el análisis a cada uno de los anteriores parámetros al agua residual objeto a estudio y así efectuar una evaluación acertada y de acuerdo a las condiciones con las cuales son generadas éstas aguas.

#### 1.3.1.1 Características físicas

**Sólidos.** Existen tres tipos de sólidos de importancia en las aguas residuales como son los sólidos totales (ST) que son el residuo remanente luego de evaporar y secar una muestra del agua residual a una temperatura entre 103 – 105°C; los sólidos suspendidos totales (SST) que se definen como la porción de los sólidos totales que son retenidos en un filtro con determinado tamaño de poro (usualmente 1.58 µm) luego de secarse el filtro con el residuo a una temperatura entre 103 – 105°C; por último se encuentran los sólidos disueltos totales (SDT) que se definen como la resta entre los ST y SST, principalmente están constituidos por sólidos coloidales. (Metcalf & Eddy, 2004).

Los sólidos pueden liderar el desarrollo de depósitos de lodos y de condiciones anaeróbicas cuando las aguas residuales sin tratamiento son descargada de cuerpos de aguas (Metcalf & Eddy, 2004).

**Olor.** Por lo general, los olores se deben a la descomposición de la materia orgánica presente en el agua residual. Olores muy fétidos, como a huevo podrido, indican la presencia de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), característico de agua con un tiempo de descomposición considerable, en las cuales por medio de la descomposición anaeróbica, realizada por microorganismos, el sulfato es reducido a sulfitos (Cadavid y López, 1990).

**Turbiedad.** La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión (Metcalf & Eddy, 1995).

### 1.3.1.2 Características químicas

**Materia orgánica.** Está compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas, y se expresa en términos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que es la medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos aerobios para degradar la materia orgánica, o demanda química de oxígeno (DQO) que es la medida del oxígeno utilizado para la degradación de la materia orgánica por medios químicos (Metcalf & Eddy, 2003).

Generalmente la DQO es mayor que la DBO, debido a que es mayor la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada por medios químicos que por medios biológicos. La determinación de estos parámetros se hace importante en la medida que sirven para identificar (Cadavid y López, 1990):

- La cantidad de oxígeno aproximado que se necesitará para oxidar, por proceso aerobio, la materia orgánica presente en el agua residual.
- Y, para medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento.

**pH.** Es un término usado universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o básicas de cualquier tipo de solución (Cadavid y López, 1990).

**Grasas y aceites.** Se entienden por grasas y aceites el conjunto de sustancias pobremente solubles que se separan de la porción acuosa y flotan formando natas, películas y capas iridiscentes sobre el agua, muy ofensivas estéticamente. En aguas residuales, los aceites, las grasas y las ceras son los principales lípidos de importancia. El parámetro grasas y aceites incluye ésteres de ácidos grasos de cadena larga, compuestos con cadenas largas de hidrocarburos, comúnmente con un grupo ácido carboxílico en un extremo; materiales solubles en solventes orgánicos, pero insolubles en agua debido a la estructura larga hidrofóbica del hidrocarburo. Estos compuestos sirven como alimento para las bacterias, puesto que pueden ser hidrolizados en los ácidos grasos y alcoholes correspondientes (Metcalf & Eddy, 2004).

Las grasas y los aceites son muy difíciles de transportar en las tuberías del alcantarillado, reducen la capacidad de flujo de los conductos, son difíciles de atacar biológicamente y,



generalmente, se requiere su remoción en plantas de pretratamiento. Las grasas y aceites pueden constituir un problema serio de polución en mataderos, frigoríficos, industrias empacadoras de carnes, fábricas de aceite de cocina y margarina, restaurantes, estaciones de servicio automotor e industrias de distinta índole. Su cuantificación es necesaria para determinar la necesidad del pretratamiento la eficiencia de los procesos de remoción y el grado de polución por estos compuestos. En general, su concentración para la descarga sobre el sistema de alcantarillado se limita a menos de 200 mg/l; en la norma colombiana, decreto 1594/84, a 100 mg/l (Romero, 1996).

En plantas convencionales de tratamiento, las grasas puede permanecer en el efluente primario en forma emulsificada. A pesar de la destrucción de los agentes emulsificantes por el tratamiento biológico secundario, la grasa no utilizada se separa del agua y flota en los tanques de sedimentación secundaria. Las grasas y los aceites son uno de los problemas principales en la disposición de lodos crudos sobre el suelo; por ello, uno de los objetivos de la digestión de lodos es la reducción de ellos. Además, las grasas y los aceites afectan adversamente la transferencia de oxígeno del agua a las células e interfieren con su desempeño dentro del proceso de tratamiento biológico aeróbico. La rotura de las emulsiones aceitosas puede requerir acidificación o agregación de coagulantes (Romero, 1996).

### 1.3.3 Coagulación y floculación

La coagulación y la floculación proveen el proceso de tratamiento de agua mediante el cual la materia coloidal finamente dividida y suspendida en el agua se aglomera y forma flóculos. Esto permite retirarlos mediante sedimentación, flotación o filtración. El tamaño de las partículas coloidales se encuentra entre los sólidos disueltos y la materia suspendida.

Mediante la repulsión electrostática y la hidratación se mantiene a los coloides en suspensión "estabilizados". La repulsión hidrostática ocurre porque usualmente los coloides tienen una superficie cargada debido a la presencia de una capa doble de iones alrededor de cada partícula. Así, el coloide tiene una carga eléctrica principalmente negativa. La hidratación es la reacción, en la superficie de las partículas, con el agua circundante. Los aglomerados de partículas de agua resultantes tienen una gravedad específica que difiere en muy poco de la del agua.

La repulsión electrostática entre las partículas coloidales elimina en forma efectiva las fuerzas de atracción de masas (fuerzas de Van der Waals) que harían que se junten las partículas. Los coagulantes tienen la capacidad de comprimir la capa doble de iones alrededor de las partículas coloidales. Estas controlan la repulsión electrostática y permiten así que las partículas se floculen; es decir, que formen flóculos. Estos flóculos pueden alcanzar un tamaño suficiente y un peso específico que permita removerlos mediante el asentamiento o la filtración.

**Test de Jarras.** Es el procedimiento habitual utilizando en el laboratorio para determinar las condiciones óptimas de operatividad para el tratamiento de aguas residuales. Este test simula el proceso de coagulación/floculación que se utiliza para eliminar las partículas en disolución que aportan turbiedad, olor o cambio de color en el afluente. Este método implica el ajuste del pH, selección del agente coagulante y de su dosis adecuada,

selección de velocidad y tiempo de agitación de las palas, así como el tiempo de sedimentación.

Este test se realiza en un aparato denominado floculador que consiste en un montaje de seis vasos de precipitado con sus respectivos sistemas de agitación de velocidad regulable (ver Fotografía 3).



**Fotografía 3.** Test de Jarras

Este aparato contiene seis agitadores para homogenizar el contenido de los seis vasos en los que se varían las condiciones de operación analizándose luego los resultados en cada caso, para concluir cuáles son los parámetros óptimos de depuración. Mediante una agitación rápida se dispersa el coagulante en cada uno de los vasos, después se reduce la agitación para promover la floculación y aumentar las probabilidades de colisión entre las partículas dando lugar así a flóculos de mayor tamaño. Por último se detiene la agitación para que la disolución permanezca en reposo y estos flóculos sedimenten y posteriormente se determina la turbiedad en cada jarra y se compara con la turbiedad inicial para escoger cual es la dosis óptima de coagulante.

**Coagulantes.** En general, se puede decir que los coagulantes son compuestos de hierro o aluminio capaces de promover la formación de flocs.

Los coagulantes más usados son:

- Sales de aluminio: sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, policloruro de aluminio.
- Polímeros de aluminio
- Sales de hierro: Sulfato de hierro (III) y cloruro de hierro (III)

### 1.3.4 Normatividad vigente

Colombia actualmente regula los vertimientos por medio del Decreto 1594 de 1984, el cual indica los parámetros permisibles para realizar una adecuada disposición. Según el artículo 72 y artículo 73 dependiendo si, el vertimiento es a un cuerpo de agua o al sistema de alcantarillado, los parámetros permisibles son:

**Tabla 2.** Valores de vertimiento según artículo 72.

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40°C	< 40°C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción > 80%	Remoción > 80%
Sólidos suspendidos, domésticos o industriales	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno para desechos domésticos	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno para desechos industriales	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga

Fuente: Decreto 1594 de 1984

**Tabla 3.** Valores de vertimiento según artículo 73.

Referencia	Valor
pH	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40°C
Ácidos, bases o soluciones ácidas o básicas que pueden causar contaminación; sustancias explosivas o inflamables	Ausentes
Sólidos sedimentables	10 ml/l
Sustancias solubles en hexano	100 mg/l

Fuente: Decreto 1594 de 1984

**Tabla 4.** Valores de vertimiento según artículo 73.

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
Sólidos suspendidos, domésticos o industriales	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno para desechos domésticos	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno para desechos industriales	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga

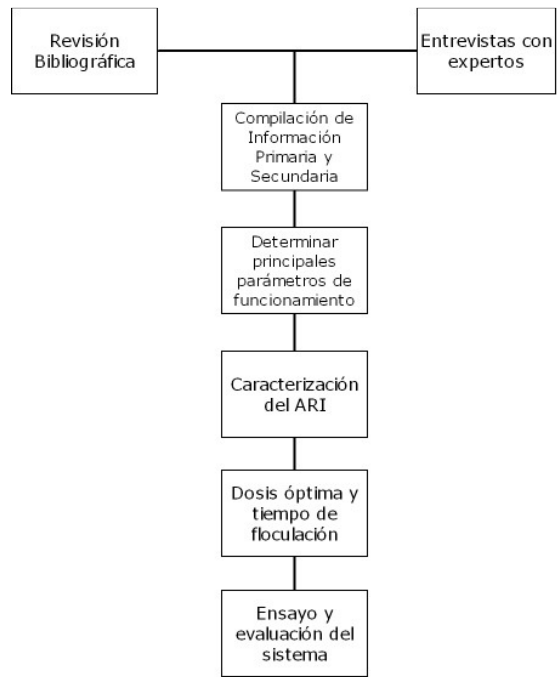
Fuente: Decreto 1594 de 1984

## 2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para cumplir los objetivos de este trabajo de grado, el procedimiento con el cual se desarrolló es la siguiente:

- a) Revisar información secundaria en libros, artículos científicos, bases de datos, folletos, revistas, entre otros, relacionadas con la tecnología de tratamiento de aguas por Flotación con Aire Disuelto.
- b) Obtener información primaria por medio de entrevistas con personas expertas y calificadas en el tratamiento de efluentes.
- c) Determinar la tasa de aplicación y el tiempo de retención del sistema FAD.
- d) Establecer requisitos necesarios para la FAD como: la relación aire/sólidos, presión que debe aplicarse al saturador y relación de reciclo.
- h) Analizar la calidad del agua residual a tratar.
- f) Realizar test de jarras y calcular la dosis óptima de coagulante, el tiempo y el gradiente de floculación.
- g) Encontrar la relación aire/sólidos, la presión que debe aplicarse al saturador y la relación de reciclo.
- i) Determinar los parámetros de operación y evaluar la eficiencia del sistema FAD.

En la siguiente ilustración se puede observar en el diagrama de flujo el procedimiento de trabajo.



**Ilustración 1.** Metodología de trabajo

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA FAD**

La tecnología de flotación por aire disuelto es actualmente aplicada en la industria:

- Cosmética
- Aceites y grasas
- Industrias Cárnicas
- Conservera
- Alimentaria en general
- Clarificación primaria en general
- Clarificación secundaria en sistemas biológicos
- Lecheras y queseras
- Petrolíferas
- Textiles
- Aguas de primera lluvia

Fuente: Dafwater, 2010.

Según la información secundaria revisada y las entrevistas realizadas a los expertos, se encontró que la tecnología FAD presenta grandes aplicaciones a nivel industrial como se menciona anteriormente. En la ciudad se aplica actualmente esta tecnología en la industria papelera para la recuperación de la celulosa y así reincorporarla al proceso como materia prima, también, esta tecnología es utilizada para la recuperación de las grasas presentes en el agua residual en la industria lechera y luego elaborar los productos derivados de éste. Dado a esto, se puede decir que esta tecnología es de gran aporte para la industria ya que permite recuperar materias primas y así mismo es empleada para el tratamiento de las aguas residuales para cumplir con lo establecido por la normatividad vigente.

Dentro de las principales aplicaciones de la FAD se encuentra el tratamiento de aguas residuales de la industria cárnica, dado a esto y la disponibilidad para obtener la muestra requerida de agua necesaria para realizar el ensayo en el laboratorio, se utilizó el agua residual proveniente de una planta de sacrificio avícola.

### **3.2 ENTREVISTAS**

Luego de consultar y revisar en los diversos sistemas de información disponibles se conoció que actualmente no existe la suficiente información acerca de la forma con la cual se debe desarrollar los ensayos de flotación por aire disuelto a escala de laboratorio. Dado esto se vio la necesidad de recurrir a entrevistas con expertos en el tratamiento de aguas residuales de la ciudad para conocer el funcionamiento del sistema.

La primera entrevista fue realizada al Ingeniero Julián Acevedo el cual pertenece al área ambiental de la Empresa Familia-Sancela, industria reconocida en el país debido a que es una de las principales productoras de papel. Durante esta entrevista, se logró obtener conclusiones muy importantes acerca de la tecnología FAD, como su eficiencia en la recolección de la celulosa del papel y también el beneficio que presenta este sistema de tratamiento de aguas residuales ya que no necesita extensas aéreas para su funcionamiento.

La segunda entrevista fue realizada al Ingeniero Darío Fernández Naranjo el cual pertenece al grupo de investigación GIGA de la Universidad de Antioquia, por medio de esta entrevista se pudo conocer los principios básicos de funcionamiento de la celda de presurización, además se realizó un repaso de las empresas de la ciudad en las cuales se había implementado este sistema y cuales podrían ser potencial para el montaje de éste.

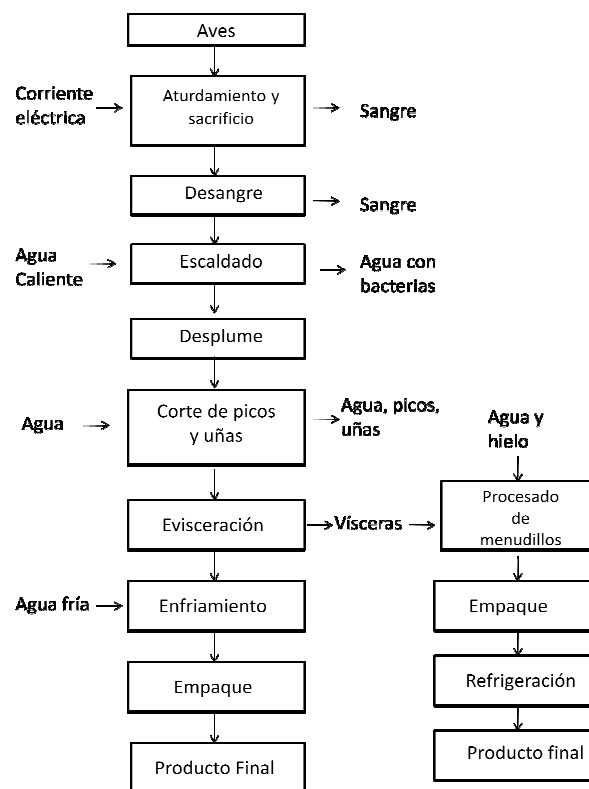
Luego de estas entrevistas, aun no se tenía claridad acerca del funcionamiento de la celda de presurización y de flotación, dado que durante la revisión bibliográfica no se lograron encontrar manuales claros acerca de la metodología o el procedimiento experimental bajo el cual se debe desarrollar la prueba de flotación. Por esto, se recurrió a la entrevista con los fabricantes del equipo, la empresa TEPESA donde el Técnico Ambiental John Jaime Restrepo Restrepo indicó el procedimiento de operación de la celda e información acerca de la relación de reciclo la cual debe estar entre 10 y 30 %, además, se confirmó la falta de información disponible para realizar este tipo de ensayos.

Seguidamente de las entrevistas y de la claridad en el funcionamiento de la celda, se procedió a realizar ensayos con agua limpia para afianzar los conocimientos adquiridos y así adquirir experticia en la operación de la celda de flotación.

### **3.3 DESCRIPCIÓN DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL**

Como se mencionó anteriormente el agua objeto de estudio para este trabajo de grado, proviene de una planta de sacrificio avícola la cual posee actualmente un tratamiento de aguas residuales obsoleto. El proceso presenta picos máximos de descarga, durante el lavado de la planta procesadora y limpieza del canal de sangre. Mientras este tiempo se eliminan viseras, gordos, plumas y sangre. Las aguas residuales provenientes de los mataderos contienen agentes contaminantes físicos y químicos, de los cuales para el desarrollo de este trabajo de grado se analizarán Sólidos Suspendidos, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Turbiedad, Grasas y Aceites, dado que estos parámetros son de gran importancia para el cumplimiento del Decreto 1594 de 1984 el cual regula los vertimientos de aguas residuales a colectores o cuerpos de aguas.

El proceso de sacrificio de aves consta de diversas operaciones donde es necesario el uso de agua. Éste inicia con el aturdimiento y sacrificio donde las aves son suspendidas de ganchos, se conmocionan eléctricamente y se les secciona el cuello con un cuchillo, seguido de este paso continúa el desangre, en el cual, el animal permanece colgado durante un periodo aproximado de cinco minutos sobre un canal colector de sangre. Luego, sigue el escaldado, donde se introducen las aves en un baño de agua caliente con una temperatura entre 50 y 80°C durante un periodo que oscila entre 1 y 3 minutos, con el fin de eliminar bacterias y facilitar el desplume. Después, se procede al corte de patas, picos y uñas pasando luego por un lavado con agua. Posteriormente, se realiza la evisceración donde se elimina la mayor parte de de los órganos contenidos en su cavidad, también se elimina la cabeza, el cuello y los tejidos asociados donde son lavados las viseras y el pollo. Inmediatamente sigue el procesamiento de menudillos, donde se realiza un lavado adicional con una mezcla de agua y hielo con el objetivo de mantenerlos en condiciones higiénicas y finalmente son empacados y refrigerados. De ahí sigue el proceso de enfriamiento y empaque. Este proceso se puede detallar en el siguiente diagrama de flujo. Ver Ilustración 2. (ACERCAR, 2002).





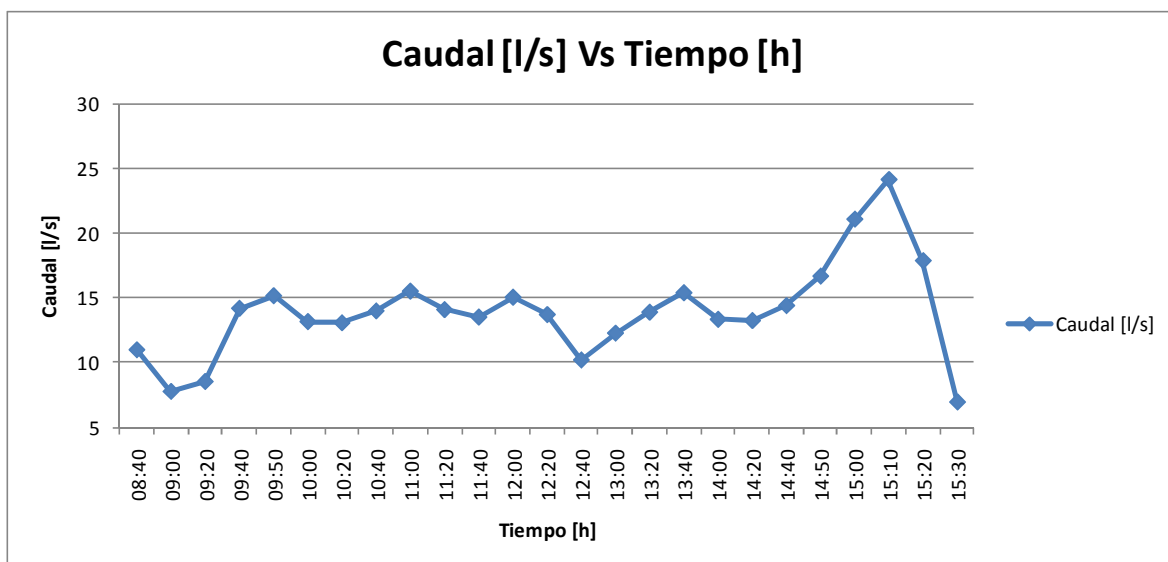
Como se puede notar en la anterior ilustración, el proceso productivo para el sacrificio de aves requiere un alto consumo de agua, debido a que en todos los procesos de éste es necesario el uso de este recurso y también para el lavado y limpieza interna de la planta.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL



**Fotografía 4.** Muestra de agua

La hora de recolección de la muestra (Fotografía 4) fue a las 8: 40 a.m. ya que durante ese tiempo se realiza el lavado de la planta y la limpieza del canal de sangre, este es uno de los momentos donde según el operador de la planta, se genera los más altos índices de contaminación del recurso. Es de anotar que el caudal diario de descarga de la planta puede presentar variaciones dado a que este depende principalmente del numero de animales sacrificad, es decir no es igual todos los días de la semana. Esta variación del caudal con respecto al tiempo se presenta en el siguiente gráfico.



**Gráfico 1.** Consumo diario de agua

Del gráfico anterior cabe enunciar que el pico de generación máxima que se presenta durante las 3:10 p.m., debido a que en ese intervalo de tiempo se inicia el lavado de la planta para terminar la jornada diaria de sacrificio de aves, sin embargo se tomó la muestra en el tiempo anteriormente mencionado ya que el objeto de este trabajo de grado es verificar la eficiencia del sistema en cuanto a la remoción de grasas y aceites y sólidos suspendidos. Debido a que la planta presenta alta variación en el caudal de descarga, se recomienda instalar un tanque de homogenización para lograr así un caudal uniforme de tratamiento.

Inicialmente se tomó una muestra para determinar las características fisicoquímicas del agua. En este paso se evaluó DQO, Sólidos Suspendidos Totales, Turbiedad y Grasas y Aceites, para luego confrontarla con la información secundaria consultada y así definir los parámetros iniciales con los cuales se diseñará el sistema de tratamiento. Los valores iniciales obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Los parámetros anteriormente descritos fueron evaluados según los Standard Methods For Examination of Water and Waste Water, identificados con los siguientes códigos:

- DQO 5220 D. Metodo Reflujo Clorimetrico Cerrado
- SST 2540 D. Secados entre 103°C -105°C
- Turbidez 2130 B. Metodo Nefelometrico
- Grasas y Aceites 5520 D. Método de Extracción Soxhlet

**Tabla 5.** Valores iniciales de vertimientos

Parámetro	Valor	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5320	mg/l
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	1957,68	mg/l
Turbidez	848	NTU
Grasas y Aceites	637,67	mg/l



**Fotografía 5.** Prueba de Grasas y aceites

### 3.5 COAGULANTE

Para seleccionar el coagulante se realizaron ensayos simultáneos que sirvieron como base para escoger el mejor de los coagulantes anteriormente descritos, para esto, se utilizó sulfato de aluminio y un polímero de aluminio con hierro, obteniendo finalmente una buena formación de floc con el segundo. Dado lo anterior el coagulante empleado en este proyecto fue el polímero de aluminio gracias a su excelente formación de floc.

### 3.6 ENSAYO INICIALES

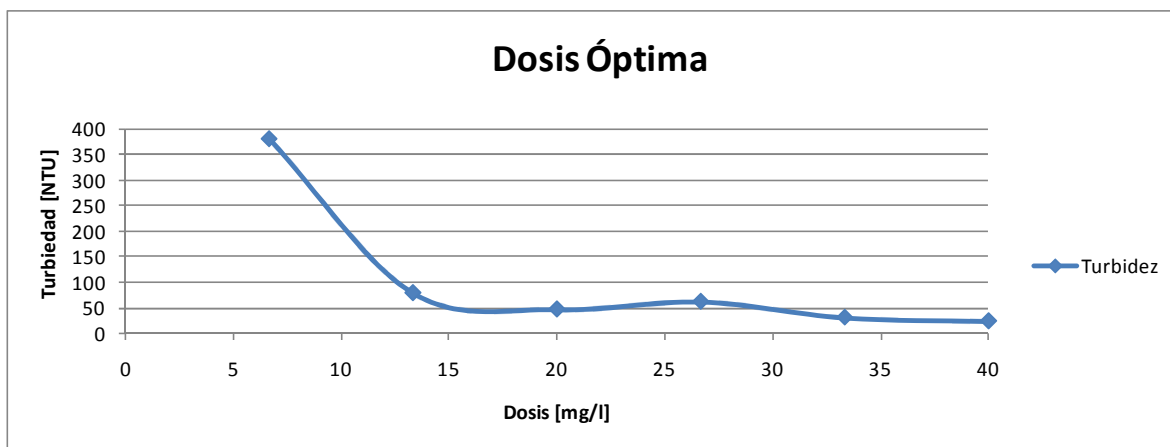
Como se mencionó anteriormente este trabajo de grado se basó principalmente en pruebas de laboratorio donde se efectuaron ensayos para la operación de la celda de flotación y luego proceder a realizar la prueba definitiva con el agua residual industrial objeto de estudio.

Posteriormente a la selección del coagulante, se efectuó el test de jarras para encontrar la dosis óptima del coagulante y gradiente y tiempo óptimos de floculación. Este procedimiento se desarrolla mediante la aplicación de coagulante en las jarras empleando una mezcla rápida durante un minuto a 100 rpm y luego una mezcla lenta durante diez min a 30 rpm para finalmente dejar reposar el líquido en las jarras durante 10 minutos.



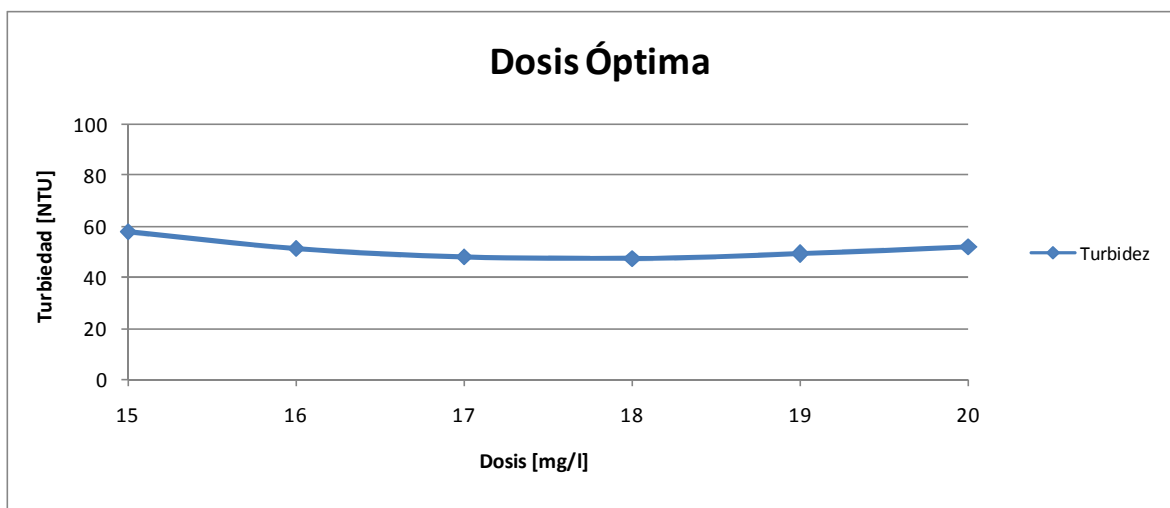
**Fotografía 6.** Obtención de la dosis óptima

La selección de la dosis óptima se realizó por medio de la aplicación de coagulante en las jarras en un intervalo entre 7 y 40 mg /l.



**Gráfico 2.** Dosis Óptima

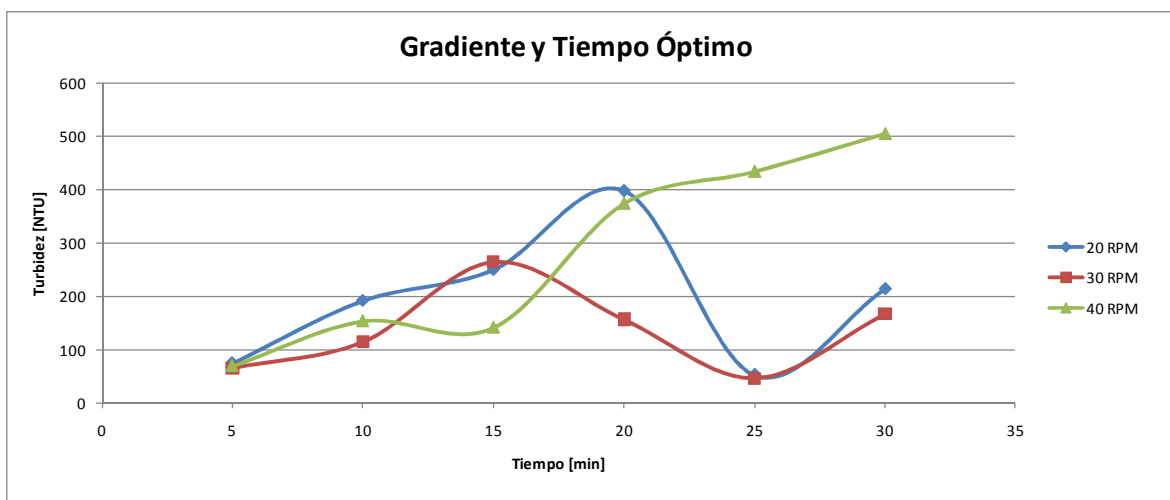
La anterior gráfica presenta una remoción de 97% con la dosis de 40 mg/l, pero también existe el intervalo entre 15 y 20 mg/l donde hay una remoción aproximada del 80%. Dado esto, es necesario realizar otro test de jarras para así obtener una dosis eficiente en el intervalo mencionado para no incurrir con un exceso de coagulante.



**Gráfico 3.** Dosis Óptima

Del anterior gráfico se observa que existe una reducción de la turbiedad del 90% cuando se le agrega 18 mg/l de coagulante. Dado esto, esta será la dosis empleada en el sistema de tratamiento por flotación por aire disuelto. Es de anotar que para encontrar la anterior dosis descrita es necesario realizar evaluaciones al agua residual ya que esta presenta una alta variabilidad, tanto en su caudal como en su composición.

Para determinar el gradiente óptimo de floculación, se realizó un nuevo ensayo donde a cada jarra se le aplicó la dosis óptima y se varió el gradiente de agitación y el tiempo de floculación.



**Gráfico 4.** Gradiente y tiempo óptimo de floculación

En el Gráfico 4 se pueden observar dos tiempos óptimos de floculación, uno a los 5 minutos donde hay una remoción de turbiedad de 91% y otro a los 25 minutos donde hay una remoción de turbiedad del 94%. Dado a que esta disminución no presenta una

variación significativa, se escogió el menor tiempo, por tanto la agitación se debe realizar a 20 rpm durante 5 minutos y con un tiempo de sedimentación de 10 minutos.

### **3.7 ENSAYO DE FLOTACIÓN**

Una vez obtenidos la dosis óptima y el gradiente y tiempo óptimos de floculación, se inició el procedimiento de ensayo en la celda de presurización y flotación. Para obtener los parámetros de funcionamiento de éstas, se realizó lo sugerido en la metodología revisada donde se mencionaba realizar una agitación a la celda de presurización durante 20 minutos para lograr homogenizar la mezcla de agua con el aire presurizado. Esto inicialmente fue desarrollado según lo propuesto, pero al analizar esto se concluyó que no era práctico realizar este procedimiento ya que a nivel del tratamiento de aguas residuales industriales sería complicado ejercer esta agitación.

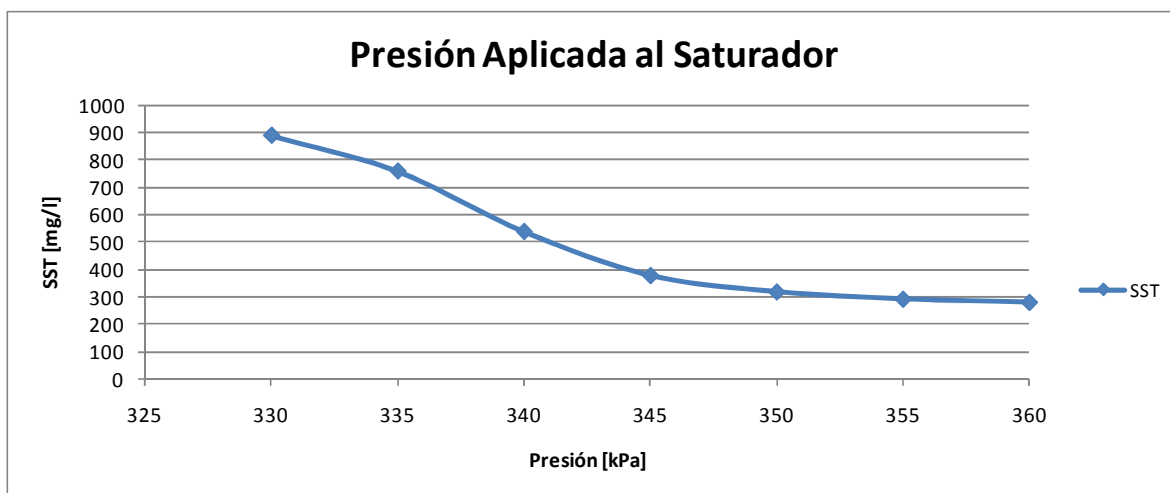
Al obtener un resultado negativo de funcionamiento de los equipos a escala de laboratorio, se decidió realizar la entrevista con el fabricante de la celda. Donde se expusieron cuales eran los accesorios necesarios para el funcionamiento de ésta y se concluyó que el correcto funcionamiento de la celda de presurización dependía en gran parte de una válvula tipo aguja que se encargaba de permitir el paso del agua presurizada hacia la celda de flotación.

Inicialmente para emprender el ensayo con la celda de presurización según los consejos sugeridos por personal de TEPESA, se utilizó agua potable para lograr obtener un manejo adecuado de la celda y de la válvula tipo aguja para lograr formar las microburbujas necesarias para flotar el floc. Durante este ensayo se corroboró la presión que se le debe aplicar al saturador para lograr la generación de micro burbujas necesarias para promover el ascenso del floc.

Para realizar el ensayo en la celda de flotación se debe tener en cuenta dos factores que garantizan el buen funcionamiento de ésta. Primero, es necesario obtener buena coagulación ya que si se obtiene un floc muy pesado la presión del aire será incapaz de flotarlo, y segundo, se debe tener control de la válvula tipo aguja ya que el paso de agua presurizada de manera rápida puede causar la creación de burbujas grandes que pueden destruir el floc.

Se inició el proceso realizando una clarificación del agua, asimilando ésta como si fuera el producto de un proceso de flotación anterior, es decir realizar un reciclo de agua residual tratada para saturarla de aire y así producir las microburbujas y proceder con la flotación.

Para obtener la presión adecuada que se debía ejercer al saturador se hizo necesario realizar ensayos variando la presión de saturación entre 330 kPa y 360 kPa, para luego determinar por medio de la evaluación de Sólidos Suspendidos Totales presentes en el agua clarificada, la presión óptima que se debía aplicar al saturador para obtener las micro burbujas que realizarían el mejor ascenso del floc.



**Gráfico 5.** Presión óptima de saturación

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los valores obtenidos luego de realizar el ensayo a diferentes presiones de saturación. En él, se puede observar que la presión de saturación tiende a seguir una línea recta luego de alcanzar 355 kPa, alcanzando una eficiencia mayor al 80%. En la siguiente tabla se pueden observar los parámetros de funcionamiento con los cuales se debe operar la celda de presurización.

**Tabla 6.** Parámetro de funcionamiento

Parámetro	Valor	
Relación Aire Sólidos (A/S)	0,001	mg/mg
Presión aplicada al saturador	355	kPa
Relación de recirculación	30	%

Luego de este paso, se cargo la celda de presurización a una presión de 355 kPa y con la válvula tipo aguja se inicio el paso de agua saturada con aire hacia la celda de flotación donde se encontraba el agua residual a tratar, hasta observar el ascenso del material floculado.



**Fotografía 7.** Microburbujas celda de flotación

Luego de realizar varios ensayos en la celda de flotación bajo las condiciones establecidas en las pruebas preliminares (coagulación y floculación) se pudo observar que los flocs formados no flotaban en su totalidad, razón por la cual se decidió reducir la dosis del coagulante a 15 mg/l para lograr un floc más liviano y lograr la flotación de éste. En la siguiente ilustración se observa el agua residual coagulada y floculada.



**Fotografía 8.** Agua residual coagulada y floculada

En la Fotografía 8 se puede observar el agua oscura en la parte inferior de la celda debido a la formación de floc en esta parte de la celda de flotación.



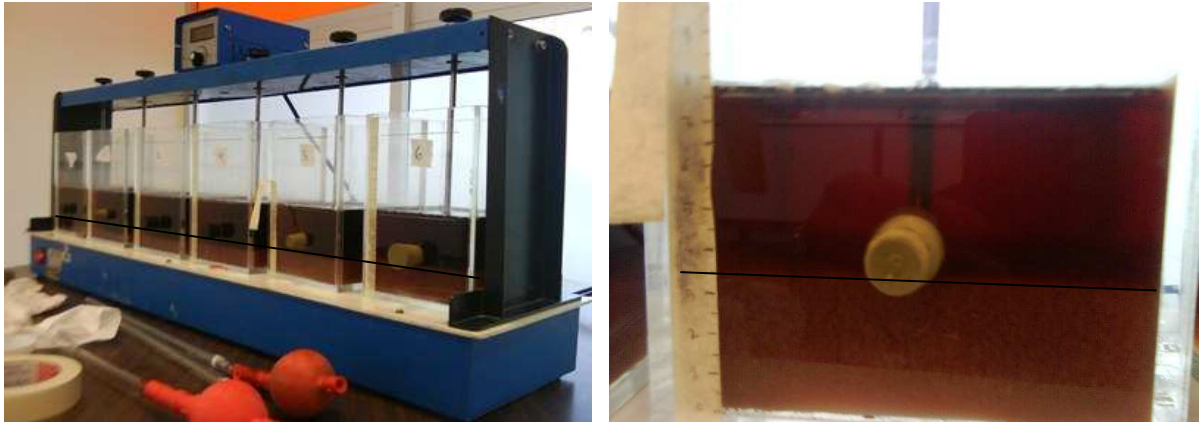


**Fotografía 9.** Agua residual luego de la flotación por aire disuelto

En la Fotografía 9 se observa dos diferentes fases, una de agua clara en la parte inferior y otra de material flotante en la superficie del recipiente

Luego de realizar la saturación del agua residual con aire en la celda de presurización se inicio el flujo de agua hacia la celda de flotación para luego esperar un tiempo de 15 minutos para obtener la completa flotación del floc y estabilización de las dos fases.





**Fotografía 10.** Sobrenadante de material suspendido

En las anteriores fotografías se logra evidenciar la cantidad de lodos producidos mediante la aplicación de la flotación por aire disuelto y la coagulación. Luego de esta comparación se puede inferir que existe una menor producción de lodos aplicando FAD, ofreciendo un beneficio económico ya que habrá un ahorro en el tratamiento de éstos.

También se observa el agua clara en la parte inferior y el agua con el material flotante de la parte superior producto de la flotación por aire disuelto. Luego se tomo una muestra de cada una de las partes y se le realizó el análisis de los mismos parámetros evaluados inicialmente. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7.** Resultados obtenidos

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final		Eficiencia %
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5320	688	mg/l	87
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	1957,68	293,75	mg/l	85
Turbidez	848	35	NTU	96
Grasas y Aceites	637,67	61,92	mg/l	90

Los resultados presentados en la Tabla 7 fueron obtenidos luego de realizar el ensayo final completo de la celda de flotación acompañado por un proceso de coagulación para luego compararlos con los valores obtenidos inicialmente en la Tabla 5. Estos resultados demuestran que la flotación por aire disuelto es un tratamiento de aguas residuales eficiente ya que presenta una buena remoción en los parámetros analizados y evaluados.

## 4. CONCLUSIONES

La flotación por aire disuelto es una tecnología aplicable a aguas residuales industriales con un alto contenido de sólidos suspendidos, grasas y aceites como la de las plantas de sacrificio avícola, dado que presenta una eficiencia superior al 80% en la remoción de los parámetros mencionados y excelente disminución de la DQO.

La relación aire/sólidos, es decir, la presión ejercida al saturador y la relación de recirculación son los principales parámetros para la operación del sistema FAD, dado que si no hay una buena interacción de éstos puede llegar a no darse la formación de micro burbujas.

La prueba de jarras indicó que la dosis de 15 ppm del Polímero de Aluminio con Hierro presenta buena formación de floc en aguas con alto contenido de sólidos suspendidos, grasas y aceites.

La eficiencia del sistema de flotación por aire disuelto depende principalmente de la dosis óptima de coagulante y la presión de saturación, dado que si se forma floc muy pesado, será imposible la flotación de éste por parte de las micro burbujas.

Se observa una menor producción de los lodos en el sistema FAD que en el proceso coagulación-floculación, por lo cual se puede inferir que los costos de tratamientos de estos son menores en el sistema propuesto.

La eficiencia de remoción de contaminantes por parte del sistema de flotación por aire disuelto en el agua residual evaluada es superior al 80% en cuanto a la reducción de la DQO, SST, grasas y aceites. Las grasas y aceites son una fracción de los sólidos concentrados en el sobrenadante.

## 5. RECOMENDACIONES

Debido a que la planta de sacrificio presenta picos muy variados de descarga, se recomienda instalar un tanque de homogenización para regular el caudal y la composición del agua con el fin de evitar un colapso de la planta residual debido a los vertimientos puntuales generados en determinadas horas del día. Además, con la instalación de este tanque se puede determinar un caudal de diseño adecuado para no incurrir en elevados gastos económicos debido al sobre dimensionamiento de la planta de tratamiento.

Se recomienda realizar una digestión de los lodos, para evitar el perjuicio de las poblaciones vecinas a la planta de sacrificio por la proliferación de malos olores y vectores por la descomposición de éstos.

Debido a la falta de conocimiento acerca del funcionamiento de la celda de flotación y de presurización utilizadas en el laboratorio, se recomienda realizar un diseño experimental para encontrar el número de repeticiones de los ensayos requeridos para comparar con los valores propuestos y así garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

El sistema -FAD- debe estar complementado para este caso, con un buen cribado para la retención de las plumas y gordos con el fin de evitar que estos lleguen al tanque de homogenización y por consiguiente ocasionen ineficiencia del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

ACERCAR. Unidad de asistencia para la pequeña y mediana industria: Beneficio de Aves.[on line].Julio de 2002.Colombia.[citado octubre de 2009]. Disponible en internet: <http://www.acercar.org.co/industria/manuales/baves.html>

ARVANITOYANNIS, Ioannis y LADAS, Demetrios. Meat waste treatment methods and potential uses. [on line]. Septiembre de 2006.[citado marzo de 2009]. Disponible en internet: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=afh&AN=28680210&lang=es&site=ehost-live> m.

American Water Works Association y Water Environment Federation. Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater. 20 Ed. Estados Unidos. APHA.1998.

CADAVID RESTREPO, Jaime Alonso y LÓPEZ RESTREPO, Jorge Mauricio. Evaluación del Funcionamiento de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales, Compuesto de un Tanque Séptico Seguido de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Tesis de Grado. 1990.

CISNEROS, Ana Lucia. Separación de y Aceites en Aguas Residuales mediante el proceso de flotación por aire disuelto. [on line]. 2006. [citado marzo de 2009]. Disponible en internet: <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IscScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=40106&indexSearch=ID>.

DAFWATER Flotation Technologies. Aplicaciones típicas del DAF.[on line].2010.[citado mayo de 2010]. Disponible en internet: <http://dafwater.com/d.3333;boto.2:Aplicaciones-DAF>

Decreto 1594 de 1984. Legis, Bogotá 2003.

IDEAM. Temas Ambientales: Toma y preservación de muestras. [on line].2001.[citado octubre de 2009]. Disponible en internet: <http://www.ideam.gov.co/temas/calidad/muestreo.pdf>.

ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos. Remoción de Aceite Emulsionado en Aguas Residuales mediante Flotación por Aire Disuelto. En: Revista Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquia. Medellín. Noviembre, 1996. vol.0, no. 12; p. 52-60.

MARQUEZ, Adriana y GUEVARA, Edilberto. Descripción y evaluación del funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales en una industria avícola. [on line]. Agosto de 2004. [citado marzo de 2009.] Disponible en internet: <http://servicio.cid.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v11n2/11-2-9.pdf> .

MARUYAMA, Ciro. El agua en números. [on line].marzo. 2006. [citado marzo de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.rel-uita.org/agricultura/ambiente/agua/agua-en-numeros.html>.

METCALF & EDDY, Inc. Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. 3 Ed. Madrid. McGraw Hill, 1995. 1459 p. ISBN 84-481-1612-7.

METCALF & EDDY, Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4 Ed. New York. McGraw Hill, 2004. 886 p.

MOLINET, Victor y PIGEM, Rodrigo. Tratamiento de aguas residuales de matadero. [on line]. Julio de 2004. [citado marzo de 2009]. Disponible en internet: <http://biblioteca.upc.es/bustia/arxius/51032.pdf#page=27>.

MONTGOMERY, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. 2 Ed. Mexico. Editorial Limusa, 2007. 686 p.

MUÑOZ, Deyanira. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Matadero para una población menor a 2000 habitantes. [on line].Febrero de 2005.[citado marzo de 2009]. Disponible en internet: <http://www.unicauca.edu.co/biotecnologia/ediciones/vol3/Art312.pdf>.

ROMERO, Jairo. Acuíquímica.1Ed.Colombia.Editorial Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería.1996.226 p.

RIGOLA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales.[online].1999.Mexico.[citado marzo de 2009]. Disponible en internet: <http://books.google.com.co/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA137&dq=composicion+del+agua+residual+industrial&lr=#PPA140,M1>.

SAWYER, Clair N; MCCARTY, Perry L y PARKIN, Gene F. Química para Ingeniería Ambiental. 4 Ed. Colombia. McGraw Hill, 2001. 713 p.

VALENCIA, Guillermo. Tratamientos Primarios. [on line]. Diciembre de 1976.[citado marzo de 2009]. Disponible en internet: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan2/05862/05862-08.pdf>